

# 强激光驱动 316L 不锈钢靶板变形速度数值模拟

纪看看<sup>1</sup> 张兴权<sup>1</sup> 邓磊<sup>2</sup> 黄志来<sup>1</sup> 段士伟<sup>1</sup> 戚晓利<sup>1</sup> 陈彬<sup>3</sup>

<sup>1</sup>安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243002

<sup>2</sup>华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

<sup>3</sup>安徽工业大学管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243002

**摘要** 采用动力学有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对 316L 不锈钢靶板在脉宽为纳秒量级的强激光诱导的冲击波作用下的变形速度进行了数值模拟, 建立了适用于高压高应变率条件下的有限元模型, 并将数值模拟得到的速度曲线与前人实验结果进行了比较, 验证了模型的正确性。此外, 靶板的变形速度随冲击波压强的增加而增大, 随靶板厚度的增加而减小。模拟结果对研究激光冲击成形、靶板层裂以及侵彻等过程具有参考意义。

**关键词** 激光技术; 激光冲击; 316L 不锈钢; 速度; 压强; 厚度

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1102007

## Numerical Simulation on Deformation Velocity of 316L Stainless Steel Target Driven by Intense Lasers

Ji Kankan<sup>1</sup> Zhang Xingquan<sup>1</sup> Deng Lei<sup>2</sup> Huang Zhilai<sup>1</sup> Duan Shiwei<sup>1</sup>  
Qi Xiaoli<sup>1</sup> Chen Bin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>3</sup>School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China

**Abstract** The dynamic finite element software ANSYS/LS-DYNA is used to numerically simulate the deformation velocity of 316L stainless steel target after the influence of shock waves induced by intense lasers with pulse duration of nanosecond scale, and a finite element model suitable under the high pressure and high strain rate conditions is established. The velocity curves obtained from the numerical simulation are compared with the previous experimental results and the validity of the above model is confirmed. In addition, the deformation velocity increases with the increase of the shock wave pressure and decreases with the increase of the target plate thickness. These simulation results provide a reference for the study of those processes, such as laser shock forming, spallation and penetration.

**Key words** laser technique; laser shocking; 316L stainless steel; velocity; pressure; thickness

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 120.7250

## 1 引言

激光冲击靶板成形是利用高能量密度脉冲激光束和金属靶材相互作用产生的冲击波使靶板产生塑性变形的一种崭新的钣金件成形工艺。与传统的靶板冲压成形工艺相比, 其优势包括成形效率高, 模具简单, 成形后

收稿日期: 2016-07-04; 收到修改稿日期: 2016-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(51675002)、华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金(P2017-007)、安徽工业大学青年教师科研基金(QZ201518)、安徽工业大学研究生创新研究基金(2015044)

作者简介: 纪看看(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光塑性成形方面的研究。E-mail: jkk114f@163.com

导师简介: 张兴权(1970—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事激光加工方面的研究。

E-mail: zhxq@ahut.edu.cn

工件的表面质量好<sup>[1]</sup>,对环境无污染等。因此激光冲击靶板成形工艺广泛应用于航空航天和微电子等领域。

激光冲击成形和传统冲压成形不同,其作用在靶板表面上的成形力不是一个恒定的压力,而是一个压力脉冲,持续一段时间后消失。靶板获得动量和初始速度后快速运动,与模具贴合得到所需的形状<sup>[2-3]</sup>,靶板获得的初始速度大小影响着靶板最终变形量的大小和成形精度。由于激光加载时间为纳秒量级,材料应变率高达  $10^6 \text{ s}^{-1}$ ,金属靶板的变形过程是一个复杂的超快动态过程。目前,轻气炮加载导致材料应变率为  $10^4 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ <sup>[4]</sup>,普通的实验装备难以测量材料变形速度,即使是广泛应用的 Hopkinson 压杆也难以对高应变率材料瞬时发生的动态响应进行有效测量<sup>[5]</sup>。近年来,速度干涉仪(VISAR)测速技术开始应用于激光冲击波加载靶板后速度的测量,即通过变像管扫描相机和高速光电分幅相机分别记录信号载体梳状干涉条纹,从而实现靶面速度的测量。VISAR 测速技术采用的光电仪器较为复杂,装置庞大且价格昂贵,安装、调试和维护比较困难<sup>[6]</sup>,目前还难以广泛应用于激光冲击靶板速度的测量。Peyre 等<sup>[7]</sup>曾经用 VISAR 系统测量了靶板在冲击波作用下的变形速度,但得到的测量曲线仅限于初始的 500 ns 变形阶段,也没有对初始阶段速度曲线的振荡进行解释。

本文采用 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟了 Peyre 等<sup>[7]</sup>关于激光冲击 316L 不锈钢靶板的实验,模拟采用的参数与实验参数相同,并将模拟结果与 Peyre 等<sup>[7]</sup>用 VISAR 系统测得的变形速度进行了比较。在有限元模型得到验证的基础上,进一步研究了激光冲击波的压强和靶板厚度对靶板变形速度的影响。

## 2 变形速度分析和 VISAR 测速原理

激光直接照射靶材表面会损坏材料的性能<sup>[8]</sup>,为了获得更好的激光冲击效果,在烧蚀模型的基础上作了进一步改进。利用高功率、短脉冲的强激光束辐射金属材料表面,涂覆在金属材料表面的吸收层吸收激光的能量瞬间气化、电离形成等离子体。等离子体继续吸收激光的能量,在极短的时间内形成高温高压的等离子体,高温高压的等离子体膨胀形成冲击波,对板材施加一个冲量并在板材内部诱导应力波产生<sup>[9]</sup>。约束层起到延长激光冲击波作用时间和提高峰值压强的作用<sup>[10-11]</sup>,增强了冲击成形的效果。

在激光冲击波的作用下,靶板从冲击波获得动量和速度后快速运动,以靶板上表面中心为原点建立图 1 右上角所示的直角坐标系,冲击波加载的方向为  $Z$  轴负方向,在激光冲击波作用区域取距离光斑中心  $r$  处、宽度为  $\Delta r$  的圆环体为研究对象。在  $t$  时刻,冲击波对靶板的压强可以表示为时间  $t$  和半径  $r$  的函数  $P(r, t)$ ,靶板获得的冲量增量  $dI$  为

$$dI = 2\pi r \cdot P(r, t) dr dt. \quad (1)$$

在冲击波作用时间内靶板获得的全部冲量为

$$I = \int_0^{\tau} \int_0^{r_0} 2\pi r \cdot P(r, t) dr dt, \quad (2)$$

式中  $r_0$  为激光光斑的直径,  $\tau$  为冲击波加载的时间。

冲击波产生的冲量全部传递给靶板,靶板获得初速度  $v_0$ ,由于惯性的作用,在激光冲击波加载结束后,靶板仍以该速度继续运动。由于材料本身的阻抗以及靶板变形对能量的消耗,最后靶板停止运动。根据动量定理,有

$$I = mv_0 = \rho \pi r_0^2 h v_0, \quad (3)$$

式中  $m$  为冲击波作用区域内靶板的质量,  $\rho$  为靶材的密度,  $h$  为靶板的厚度。

考虑到气化物的弥散效应使气化物的压强分布均匀,即  $P(r, t) = P(t)$ ,由(2)式得到冲击波对靶板的冲量为

$$I = \pi r_0^2 \int_0^{\tau} P(t) dt. \quad (4)$$

由(3)、(4)式得到靶板获得的初速度为

$$v_0 = \frac{\int_0^{\tau} P(t) dt}{\rho h}. \quad (5)$$

由于模拟采用的不同载荷对靶板的作用时间相同,因此靶板获得的初速度与冲击波压强的大小成正比,与靶板的厚度成反比。

图 1 为 Peyre 等<sup>[7]</sup>测量靶板下表面速度时采用的任意面反射速度干涉仪 VISAR 系统。钕玻璃激光器产生的探测激光束辐射到被测靶材表面并发生反射形成反射光路,冲击波使靶板发生变形,因此两干涉激光束到达被测物体表面的时间不同。记录两干涉光束的相位信息,计算还原出被测表面的速度。由于干涉光路传播的时间极其短暂,因此该 VISAR 测速系统的误差非常小。

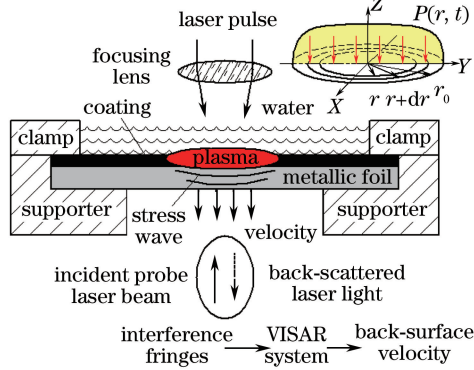


图 1 激光冲击过程中靶材下表面自由速度测量<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Measurement of back-surface free velocity of target in laser shock process<sup>[7]</sup>

### 3 有限元分析

#### 3.1 材料的本构模型

Peyre 等<sup>[7]</sup>用 VISAR 系统测量了厚度为 0.20 mm 的 316L 不锈钢薄板在激光冲击诱导下的速度-时间曲线。实验采用的激光器为调 Q 钕玻璃激光器,激光波长为 1.06 μm,能量密度为 4 GW · cm<sup>-2</sup>,光斑直径为 4 mm,涂层为铝箔,加载压强为 4.6 GPa。此处采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对其进行模拟,模拟时,材料的模型为带有 Cowper-Symonds 参数的随动硬化模型(C-S 模型):

$$\sigma_Y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_P \epsilon_P^{\text{eff}}), \quad (6)$$

$$E_P = \frac{E_{\text{tan}} E}{E - E_{\text{tan}}}, \quad (7)$$

式中  $\sigma_Y$  为 Von Mises 流动应力; $\dot{\epsilon}$  为应变率; $\sigma_0$  为初始屈服应力; $\beta$  为硬化指数; $E_P$  为塑性硬化模量; $E$  为弹性模量; $\epsilon_P^{\text{eff}}$  为有效塑性应变; $E_{\text{tan}}$  为切线模量; $C$ 、 $P$  为应变率参数。316L 不锈钢材料的参数为:密度  $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$ ;初始屈服应力  $\sigma_0 = 300 \text{ MPa}$ ;弹性模量  $E = 195 \text{ GPa}$ ;泊松比  $\nu = 0.29$ <sup>[7]</sup>;切线模量  $E_{\text{tan}} = 1.75 \text{ GPa}$ <sup>[12]</sup>。

#### 3.2 网格的划分

激光冲击成形实验模型为上表面用压板固定、下表面用支撑板固定的约束模型,根据冲击波压强加载条件和约束条件的特点可将金属薄板划分为图 2 所示的三个区域,自内向外依次为:A1 冲击区(图 2 中红色区域),直径为 4 mm,是激光光斑辐照区域,用于激光冲击波压强的加载;A2 变形过渡区(图 2 中绿色区域),外径为 10 mm,与支撑板的内径相同,用来辅助靶板完成成形过程,此部分不施加任何约束和载荷;A3 边界区(图 2 中灰色区域),外径为 16 mm,用于压板对板材的固定。

模拟采用的单元类型为 3D-SOLID164 实体单元,网格类型为六面体网格。为了节约计算机资源、提高计算速度,根据模型的对称性特点,采用 1/4 模型,在对称面(图 2 中蓝色区域)施加对称约束。为了便于网格的划分,建模时在有限元软件 ANSYS 前处理器中先建立与三个区域尺寸一致的 1/4 圆柱体,然后用体扫掠的方式对靶板进行网格划分,同时控制与靶板厚度方向 Z 轴平行的方向单元尺寸大小为 0.02 mm。为了在保证计算速度的同时捕捉到应力波,采用中心密四周疏的网格划分方式<sup>[13]</sup>,控制冲击区域的单元尺寸大

小为 0.02 mm, 变形过渡区域和约束区域的单元尺寸大小为 0.05 mm。网格划分完之后, 靶板沿厚度方向分成 10 层, 因此模型总计有 279150 个单元, 310365 个节点。

### 3.3 冲击波的加载

在激光冲击波压力成形的过程中, 冲击波加载的时间极其短暂(纳秒量级), 而加载的压强非常大(吉帕量级), 且冲击波产生的机理非常复杂。激光束在金属靶材表面诱导的冲击波压强的大小是实验所用激光以及吸收层和约束层等参数共同决定。根据 Peyre 等<sup>[14]</sup>得到的冲击波加载压强-时间曲线, 计算出模拟所需的峰值压强大小为 3.0, 4.6, 6.0 GPa 的压强-时间曲线, 如图 3 所示。以该曲线作为数值模拟的加载曲线, 在进行模拟运算时, 在 ANSYS 软件中输入与图 3 曲线对应的压强-时间参数, ANSYS 程序会利用插值运算法计算出任意时间点的载荷大小, 将相应值加载到有限元模型中。

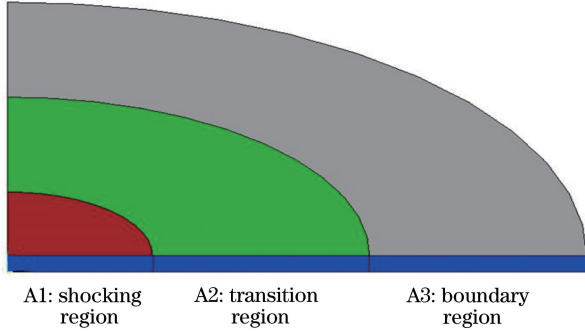


图 2 模型区域划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model region division

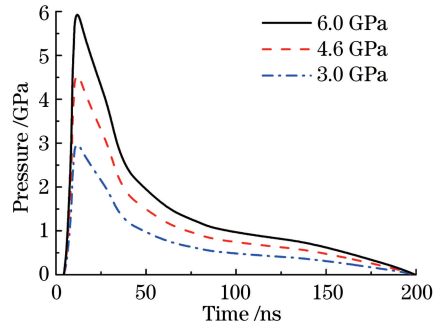


图 3 压强-时间加载曲线

Fig. 3 Loading curves of pressure versus time

## 4 模拟结果与讨论

### 4.1 输出能量

采用 ANSYS/LS-DYNA 显式分析模块进行模拟计算, 得到激光冲击过程中能量随时间变化的曲线如图 4 所示。图 4(a)为初始时刻的能量时程图, 图 4(b)为能量稳定后的能量时程图。由图 4(a)可知, 在  $2 \times 10^2$  ns 内, 由于冲击波压强加载的作用, 靶板获得一定的初速度, 总能量在压强加载结束时刻 ( $2 \times 10^2$  ns 时) 增加到最大值 0.081 J, 内能增加到 0.058 J。在  $2 \times 10^2$  ns 之后, 由于不再受到载荷的作用, 板材会在惯性的作用下继续以一定的速度运动。由于变形消耗了一定的动能, 板材表现出内能的增加和动能的减少。当靶材的动能趋于零、内能趋于固定值时, 靶材达到静态平衡状态。由图 4(b)可知, 当时间达到  $3 \times 10^4$  ns 时, 动能减少到 0, 内能增加到 0.081 J 并保持不变, 故  $3 \times 10^4$  ns 可作为模拟过程的求解时间, 且整个过程中的沙漏能几乎为 0, 满足有限元分析中关于沙漏能控制的要求。

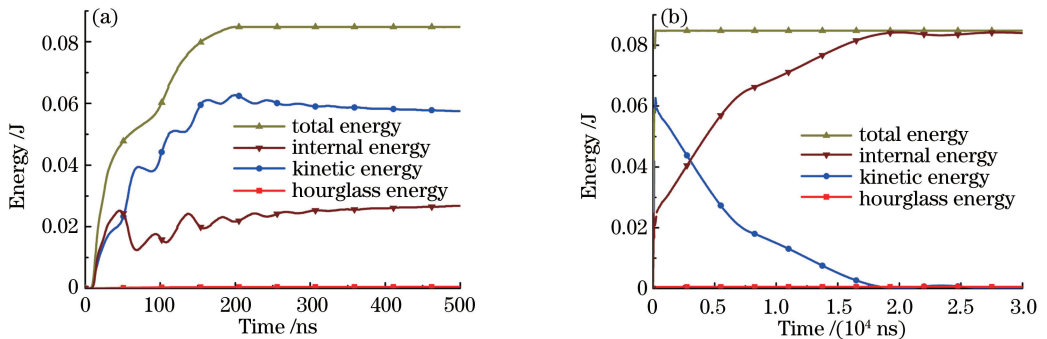


图 4 能量时程曲线。(a)  $5 \times 10^2$  ns; (b)  $3 \times 10^4$  ns

Fig. 4 Curves of energy versus time. (a)  $5 \times 10^2$  ns; (b)  $3 \times 10^4$  ns

### 4.2 速度时程曲线

激光作用于金属靶板, 初始时刻只有上表面介质离开初始位置, 并对相邻位置的介质产生反作用力, 使



之也偏离初始位置而发生移动,由此产生了材料内部传播的应力波。根据应力波理论,弹性波与塑性波在 316L 不锈钢中的传播速度分别为

$$C_1^e = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \cdot \frac{1}{\rho} = 5687.4 \text{ m/s}, \quad (8)$$

$$C_1^p = \sqrt{\frac{E}{3(1-2\nu)}} \cdot \frac{1}{\rho} = 4426.1 \text{ m/s}. \quad (9)$$

弹性波和塑性波从厚度为 0.20 mm 的 316L 不锈钢靶材上表面传播到下表面所需的时间分别为

$$t_1^e = \frac{h}{C_1^e} = 35.166 \text{ ns}, \quad (10)$$

$$t_1^p = \frac{h}{C_1^p} = 45.187 \text{ ns}. \quad (11)$$

弹性波和塑性波的传播对靶板的变形速度有一定的影响,当光斑直径为 4 mm、靶板厚度为 0.20 mm、压力压强为 4.6 GPa 时,316L 不锈钢下表面中心节点初始时刻的模拟速度-时间曲线如图 5 所示。在初始时刻,由于加载的应力波未传播到靶材底面,靶板未发生变形,所以变形速度为 0,之后压缩应力波的加载使底面中间节点的速度逐渐增大。压缩波传到自由面后发生反射,压缩波转化为拉伸波,拉伸波作用的方向与加载的压强方向相反,节点的速度逐渐减小。当拉伸波再次传到上表面时,拉伸波转化为压缩波,靶板再次加速,因此速度曲线发生上下波动。从(11)式可以看出,应力波在靶板中单趟的传播时间约为 45 ns,这与图 5(a)中速度大小的变化周期基本一致。在靶板运动过程中,动能转化为不可逆的塑性变形,能量逐渐耗散,速度逐渐衰减,最后趋于稳定。由图 5 可知,数值模拟得到的速度-时间曲线与 Peyre 实验基本一致,初步验证了模型的正确性。

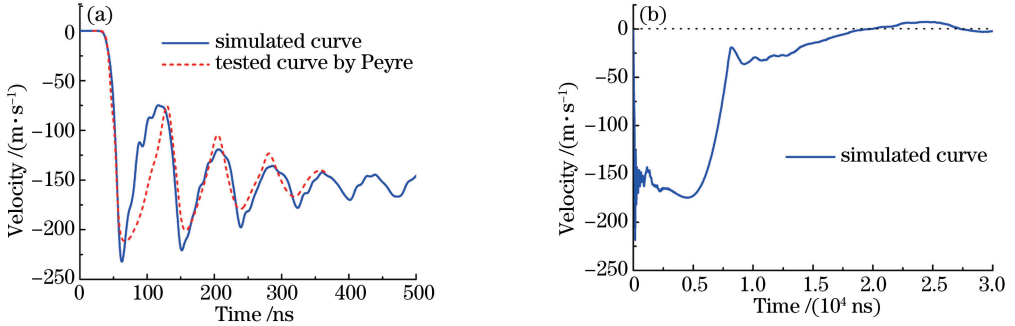


图 5 激光冲击后的速度-时间曲线。(a)  $5 \times 10^2$  ns; (b)  $3 \times 10^4$  ns

Fig. 5 Curves of velocity versus time after laser shock process. (a)  $5 \times 10^2$  ns; (b)  $3 \times 10^4$  ns

由图 5(b)可知,在  $0 \sim 5 \times 10^3$  ns 区间,速度在  $160 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  上下波动;在  $5 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3$  ns 区间,速度迅速减小;在  $8 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$  ns 区间,速度缓慢减小到 0;在  $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$  ns 区间,速度由 0 变正最后减小稳定为 0。在冲击波加载靶板过程中,首先是冲击区域从冲击波中获得动量,并以一定的速度运动,随后过渡区域在冲击区域的带动下发生运动,并影响质点的初始速度,靶板的变形范围也逐渐扩大<sup>[2]</sup>。在靶板运动过程中,应力波在材料内部传播,从冲击波中获得的动能转化为不可逆的塑性功和存储在靶板中的弹性势能等。在  $5 \times 10^3$  ns 左右,动能绝大部分转化为塑性功,靶板完成动态的塑性变形,中心节点的速度迅速减小。在变形过程中,靶板存储了大量的弹性势能需要释放,因此速度不是马上降低到 0,而是反向运动,在其存储的势能释放完后,靶板完成变形,速度稳定为 0。由于靶板运动过程比较复杂,有关速度的变化有待进一步深入研究。

### 4.3 速度云图

当压强为 4.6 GPa 时,厚度为 0.20 mm 的靶板速度云图如图 6 所示。可以看出,在  $5 \times 10^2, 2 \times 10^3, 5 \times 10^3$  ns 时刻,靶板的最大速度分别为  $164.9, 166.2, 180.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,靶板的变形量逐渐增加。 $1 \times 10^4$  ns 时刻靶板的速度减小到  $44.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,靶板产生了较大的变形。 $2 \times 10^4$  ns 时刻靶板的速度已经接近于 0,之后靶板的变形量没有明显的增加。从图 6 还可以看出,靶板不同半径区域的速度是不同的,这也是选取靶板下表面

中心节点作为研究对象的原因。

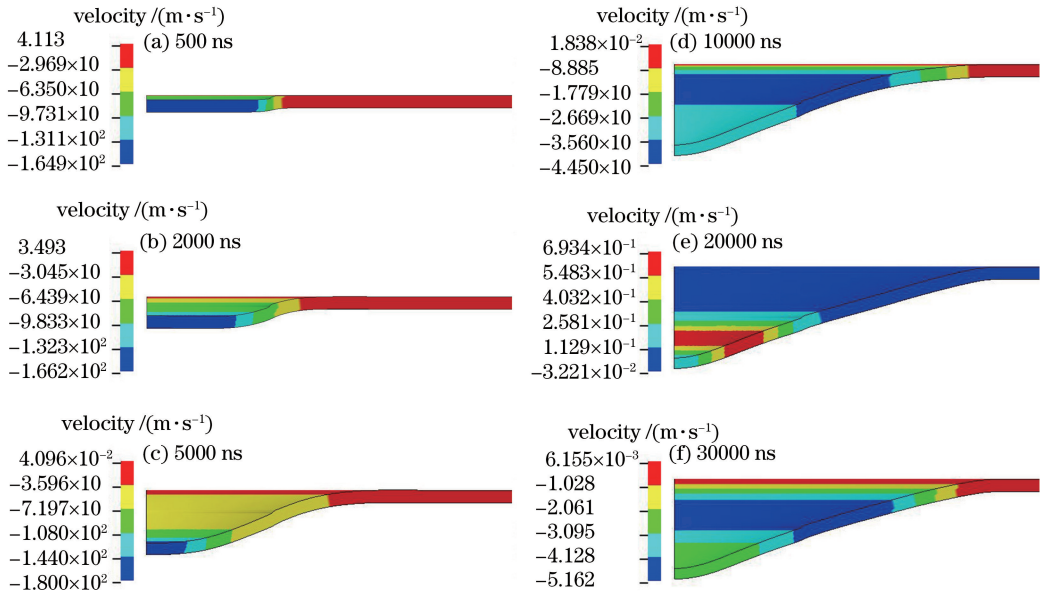


图 6 厚度为 0.20 mm 的靶板在 4.6 GPa 冲击波作用下不同时刻的速度分布云图

Fig. 6 Cloud charts of velocity distributions at different moments of target with a thickness of 0.20 mm driven by a 4.6 GPa shock wave

#### 4.4 变形形状

图 7 为模拟结束时刻  $3 \times 10^4$  ns 时板料的变形云图,可知靶板外部受到约束而未发生变形,靶板内部受冲击波作用发生了塑性变形,靶板的中心位置变形深度最大达到 1.398 mm,最终变形的形状为倒立的圆锥形。这种变形的形状已有文献报道<sup>[2,15]</sup>,在一定程度上也证明了模拟的正确性。

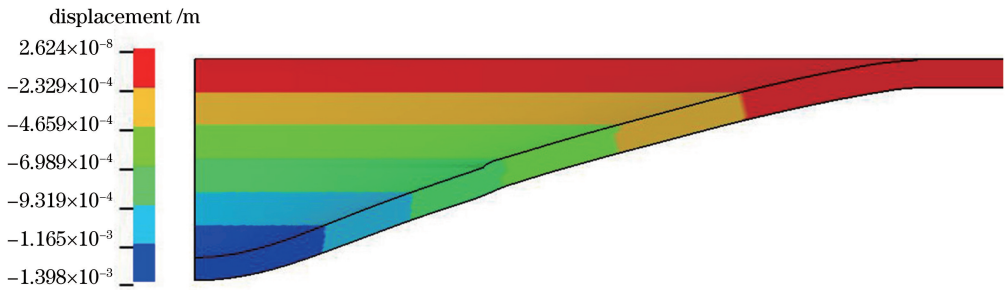


图 7 厚度为 0.20 mm 的靶板在 4.6 GPa 冲击波作用下的变形云图

Fig. 7 Cloud chart of deformation of target with a thickness of 0.20 mm driven by a 4.6 GPa shock wave

## 5 不同加载压强下变形速度

在模型得到验证的基础上,研究了相同厚度的靶板在不同压强冲击波作用下的变形速度。当压强载荷分别为 3.0, 4.6, 6.0 GPa 时,靶板下表面中心节点的速度-时间曲线如图 8 所示,可以看出不同压强下曲线的形状是相似的,冲击波的压强越大,靶板获得的初始速度就越大。从(5)式可知,冲击波加载压强越大,靶板获得的冲量越大,靶板获得的初速度也越大。采用的靶板板厚相同,应力波在靶板内部传播的速度也大致相同,因此应力波在靶板内部往返一次的时间相同,故图 8 中不同加载压强下初始阶段速度曲线的振荡频率是相同的。

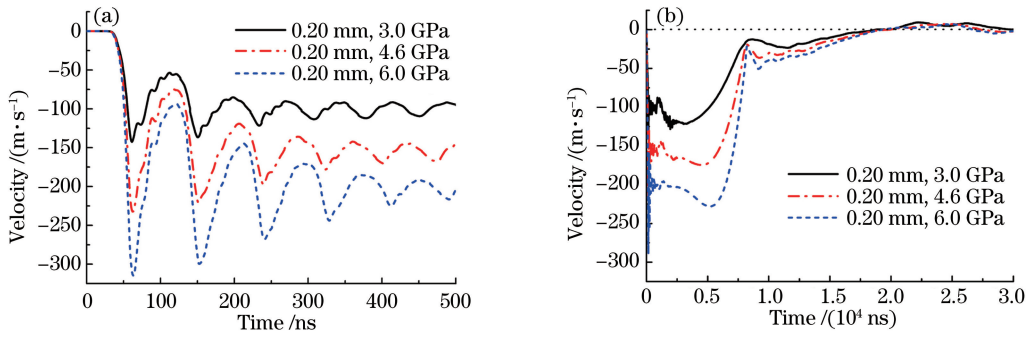


图 8 不同加载压强下速度-时间曲线。(a)  $5 \times 10^2$  ns; (b)  $3 \times 10^4$  ns

Fig. 8 Curves of velocity versus time at different loading pressures. (a)  $5 \times 10^2$  ns; (b)  $3 \times 10^4$  ns

## 6 不同厚度下变形速度

当靶板厚度分别为 0.15, 0.20, 0.30 mm 时, 靶板下表面中心节点的速度-时间曲线如图 9 所示, 可知不同厚度下曲线的形状也是相似的, 且随着靶板厚度的增加, 初始速度的峰值减小。当冲击波的压强和作用时间一定时, 靶板从冲击波中获得的冲量一定, 靶板的厚度越厚意味着靶板质量越大, 因此靶板获得的初速度就越低。从图 9(a) 还可以观察到, 厚度 0.15 mm 靶板初始阶段速度振荡频率是厚度 0.30 mm 靶板的两倍, 这是由于应力波穿过厚度 0.15 mm 靶板是穿过厚度 0.30 mm 靶板所用时间的一半。

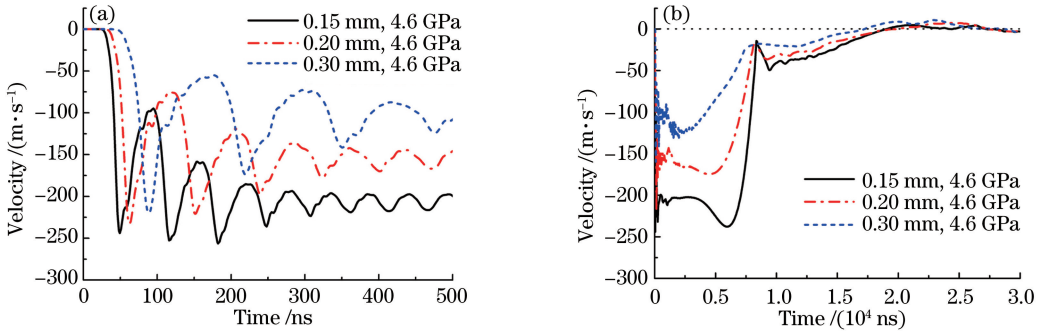


图 9 不同厚度靶板的速度-时间曲线。(a)  $5 \times 10^2$  ns; (b)  $3 \times 10^4$  ns

Fig. 9 Curves of velocity versus time for targets with different thicknesses. (a)  $5 \times 10^2$  ns; (b)  $3 \times 10^4$  ns

## 7 结 论

利用 ANSYS/LS-DYNA 动力学分析软件对前人所做的激光冲击波驱动 316L 不锈钢靶板的变形过程实验进行了数值模拟, 数值模拟结果与前人实验测量结果具有很好的一致性, 并通过理论计算分析了靶板下表面中心节点速度变化的原因。研究表明, 厚度为 0.20 mm 的靶板在峰值压强为 4.6 GPa 的冲击波作用下, 靶材下表面中心节点的速度在变形初期发生了振荡; 靶板获得的初始速度随加载压强的增加而增大, 而初始阶段速度振荡的频率不随压强的变化而变化; 在峰值压强为 4.6 GPa 的冲击波作用下, 靶板获得的初始速度以及初始阶段速度振荡的频率随厚度的增加而减小。这些结果对研究激光冲击成形、靶板层裂以及侵彻等过程具有参考意义。

## 参 考 文 献

- 1 Fan Jinrong, Huang Shu, Zhou Jianzhong, *et al.* Analysis and expectation of microscale laser shock forming[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010003.  
范金荣, 黄舒, 周建忠, 等. 激光微冲击成形技术分析与发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010003.
- 2 Zhang X Q, She J P, Li S Z, *et al.* Simulation on deforming progress and stress evolution during laser shock forming with finite element method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015(220): 27-35.

- 3 Nagarajan B, Castagne S, Wang Z K, *et al.* Influence of plastic deformation in flexible pad laser shock forming-experimental and numerical analysis[J]. International Journal of Material Forming, 2015: 1-15.
- 4 Wang Yonggang, Boustie M, He Hongliang, *et al.* Experimental study on mechanical behavior and tensile spallation of pure aluminium under laser shock loading[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(7): 966-970.  
王永刚, Boustie M, 贺红亮, 等. 强激光辐照下纯铝的力学响应和层裂的实验测量与分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(7): 966-970.
- 5 Chen Rong, Lu Fangyun, Lin Yuliang, *et al.* A critical review of split Hopkinson pressure bar technique[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(5): 576-587.  
陈 荣, 卢芳云, 林玉亮, 等. 分离式 Hopkinson 压杆实验技术研究进展[J]. 力学进展, 2009, 39(5): 576-587.
- 6 Tong Yanqun, Yao Hongbing, Zhang Yongkang, *et al.* Experimental research of high-speed plate deformation process shocked by strong and short pulsed laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0203007.  
佟艳群, 姚红兵, 张永康, 等. 强短脉冲激光冲击薄板高速变形的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0203007.
- 7 Peyre P, Berthe L, Scherpereel X, *et al.* Laser-shock processing of aluminum-coated 55C1 steel in water-confinement regime, characterization and application to high-cycle fatigue behaviour[J]. Journal of Materials Science, 1998, 33(6): 1421-1429.
- 8 Sundar R, Kumar H, Kaul R, *et al.* Studies on laser peening using different sacrificial coatings[J]. Surface Engineering, 2012, 28(8): 564-568.
- 9 Zhang Xingquan, Zhang Yan, Duan Shiwei, *et al.* Numerical simulation of dynamic response of round rod subjected to laser shocking[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0903009.  
张兴权, 章 艳, 段士伟, 等. 圆杆在激光冲击作用下动态响应的数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903009.
- 10 Dahl C. Laser-delayed double shock-wave generation in water-confinement regime[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(5): 972-978.
- 11 Gu Yongyu, Zhang Yongkang, Zhang Xingquan, *et al.* Theoretical study on the influence of the overlay on the pressure of laser shock wave in photomechanics[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(11): 5885-5891.  
顾永玉, 张永康, 张兴权, 等. 约束层对激光驱动冲击波压力影响机理的理论研究[J]. 物理学报, 2006, 55(11): 5885-5891.
- 12 Ding J, Kang G Z, Zhu Y L, *et al.* Finite element analysis on bending fretting fatigue of 316L stainless steel considering ratchetting and cyclic hardening[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 86(6): 26-33.
- 13 Zhang X Q, Li H, Duan S W, *et al.* Modeling of residual stress field induced in Ti-6Al-4V alloy plate by two sided laser shock processing[J]. Surface & Coatings Technology, 2015(280): 163-173.
- 14 Peyre P, Sollier A, Chaieb I, *et al.* FEM simulation of residual stresses induced by laser peening[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2003, 23(2): 83-88.
- 15 Zhang Qinglai, Wang Rong, Hong Yanxin, *et al.* Study on laser shock forming and fracture behavior of metal sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403010.  
张青来, 王 荣, 洪妍鑫, 等. 金属板料激光冲击成形及其破裂行为研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403010.